بهینه‌سازی متغیرهای فرایند جوش‌کاری TIG پالسی به‌منظور بهبود خواص مکانیکی اتصالات جوش‌کاری شده در آلیاژ منیزیم AZ31*

علیرضا امیرخانی[۱] علیرضا ابراهیمی[۲] رسول آذری خسروشاهی[۳]

چکیده

در این تحقیق، به منظور بهینه‌سازی متغیرهای فرایند جوش‌کاری TIG پالسی با هدف دست‌یابی به خواص مکانیکی بهینه در جوش‌های آلیاژ منیزیم AZ31، از روش طرّاحی آزمایش تاگوچی با آرایه‌ی اُرتوگنال $L_9(3^4)$ استفاده شد. بر این اساس، متغیرهای اصلی فرایند جوش‌کاری TIG پالسی یعنی شدّت جریان بیشینه‌ی پالس (I_p)، شدّت جریان کمینه‌ی پالس (I_b)، فرکانس پالس (F) و سرعت جوش‌کاری (S)، هر یک در سه تراز و در چرخه‌ی کاری یکسان بررسی شدند. سپس تأثیر هر یک از متغیرها بر روی استحکام کششی نهایی (UTS) و سختی فلز جوش ارزیابی شد. افزون بر این، روش آنالیز واریانس آنُنا برای انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای مؤثر در فرایند جوش‌کاری آلیاژ منیزیم AZ31 به‌کار گرفته شد. آزمون‌های تجربی برای تأیید نتایج انجام شدند، و نتایج حاصل مطابقت خوبی با نتایج پیش‌بینی شده‌ی بهینه نشان دادند. در نهایت، ریزساختار اتصالات جوش‌ها با توجه به خواص مکانیکی آن‌ها مطالعه شدند.

واژه های کلیدی جوش‌کاری TIG پالسی، روش تاگوچی، آلیاژ منیزیم AZ31، خواص مکانیکی.

Optimization of the Processing Parameters of Pulsed TIG Welding for the Enhancement of Mechanical Properties of Welds in AZ31 Magnesium Alloy

A.R. Amir khani A.R. Abrahimi R.A. Khosroshahi

Abstract

In this research, Taguchi method with the orthogonal array of L_9 (3^4) was used in order to optimize the parameters of pulsed TIG welding for obtaining the optimum mechanical properties (UTS) in AZ31 Magnesium alloy Weldments. For this reason, the main parameters of pulsed TIG welding including the peak current (80-120 A), the base current(20-40 A), the pulse ferequency (1.6-5 Hz), and the welding speed (200-300 mm/min) were investigated in three levels with the same duty cycle. Then, the effect of each parameter on the ultimate tensile strength (UTS) of the alloy was evaluated. In addition, in order to choose a proper set of parameters, the results were examined by varience analysis method (ANOVA). Expements were conducted to confirm the results. The results were found to have a good agreement with the predicted results. Microstructures of all the welds were studied, and their relations with the mechanical properties were evaluated.

Key Words Pulsed TIG Welding, Taguchi Method, AZ 31 Magnesium Alloy, Mechanical Properties.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۱۲/۱۶ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۱/۷/۱۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول: دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

مقدمه

منیزیم به‌علت چگالی کم و نسبت بالای استحکام به وزن، از اهمیّت بسیار زیادی در کاربردهای صنعتی از قبیل خودروسازی، هوافضا و الکترونیک برخوردار است. با این وجود، به‌دلیل شکل‌پذیری کم منیزیم، استفاده از آلیاژهای آن تاکنون محدود بوده و به‌استثنای تولید ورق‌های منیزیمی، فرایندهای جوش‌کاری تنها راه افزایش کاربرد منیزیم در صنایع مختلف است [1]. در مقایسه با روش‌های دیگر جوش‌کاری، تکنولُژی جوش‌کاری TIG مهم‌ترین روش جوش‌کاری آلیاژهای منیزیم، به‌دلیل مزایای فرایند از جمله اقتصادی بودن آن، می‌باشد [2,3]. بر خلاف جوش‌کاری با جریان ثابت، در جوش‌کاری پالسی TIG انرژی حرارتی فقط با برقراری جریان بالا (peak current) در فلز پایه فراهم می‌شود، و با پراکنده شدن در زمان جریان زمینه (background current) انجماد انجام می‌شود. نیدهام، [4]، با تغییر حرارت ورودی بین دو مقدار بیشینه و کمینه، بیان کرده است که قطعه به‌طور متناوب دچار ذوب و انجماد می‌شود، و خط جوش شامل یک‌سری دکمه‌ی جوش همپوشانی شده است. جریان بیشینه، رسوب مناسب و شکل دانه‌های فلز، جوش را کنترل می‌کنند. با توجه به این‌که در این روش گرمای ورودی به فلز پایه کاهش می‌یابد، ناحیه‌ی ذوب دانه ریزتر و کیفیّت جوش بالاتر است [5]. مزایای متالورژیکی جریان پالسی شامل ریزدانگی ناحیه‌ی ذوب، کنترل جدایش‌ها، کاهش اعوجاج و حرارت ورودی، در تحقیقات مختلف ذکر شده‌اند [6].

افزون بر این، محققین تحقیقات گسترده‌ای بر روی خواص مکانیکی اتصالات جوش در فرایندهای جوش‌کاری TIG پالسی انجام داده‌اند، و شرایطی را برای رسیدن به بهترین خواص مکانیکی اتصالات به‌وجود آورده‌اند [7-10]. تحقیقات بالاسوبرامیا و همکاران، [7]، نشان می‌دهد که متغیرهای جریان پالسی تأثیر بسیاری بر خواص مکانیکی آلیاژهای تیتانیم دارد، و برای هر یک از آن‌ها مقدار بهینه‌ای وجود دارد. افزون بر این، محققین گزارش کرده‌اند که با انجام جوش‌کاری TIG پالسی، ریزدانگی قابل توجهی در نواحی ذوب به‌وجود می‌آید و در نتیجه، خواص مکانیکی اتصالات آلیاژهای آلومینیم بهبود می‌یابد [11,9].

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی متغیرهای فرایند جوش‌کاری TIG پالسی برای بهبود خواص مکانیکی اتصالات (استحکام کششی نهایی و سختی فلز جوش) با استفاده از روش تاگوچی می‌باشد. روش طرّاحی آزمایش تاگوچی ابزاری نیرومند برای تعیین متغیرهای مهم در میان انبوهی از متغیرها با انجام تعداد کمی آزمایش (کاهش هزینه‌ها) می‌باشد. این روش، [12,13]، می‌تواند به ارزش‌یابی تأثیر هر یک از متغیرها به‌صورت مستقل بر ویژگی نشانه (استحکام کششی نهایی و سختی) بپردازد. روش تاگوچی به‌میزان زیادی برای بهبود خواص مکانیکی فلزات در فرایندهای جوش‌کاری به‌کار رفته است [7,14-17]. محققین مربوطه به این نتیجه رسیده‌اند که هر یک از متغیرهای جوش‌کاری پالسی دارای محدوده‌ی خاصی است که عبور از آن‌ها منجر به افت خواص مکانیکی اتصالات می‌شود.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، از ورق آلیاژ منیزیم AZ31 در شرایط ریخته‌گی استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) آورده شده است. عوامل عمده و مؤثر بر هندسه‌ی حوضچه‌ی جوش و ریزدانگی نواحی ذوب در جوش‌کاری TIG پالسی، از منابع مرتبط [7-10,14]، به‌دست آمدند. با وجود محدوده تغییرات وسیع عوامل مؤثر، تنها چهار عامل اصلی پالس یعنی، (i) شدت جریان بیشینه (peak current)، (ii) شدت جریان کمینه (base Current)، (iii) فرکانس پالس، و (iv) سرعت جوش‌کاری، و هر کدام در ۳ سطح بررسی شدند. تراز عوامل به‌صورت تجربی و با آزمایش‌های زیادی که حول و حوش مقادیر ثبت شده در استاندارد برای متغیرهای جوش‌کاری TIG پالسی آلیاژهای منیزیم با توجه به ضخامت ورق انجام شده‌اند، [18]، به‌دست آمدند. محدوده‌ی متغیرهای

جـوش‌کـاری TIG پالسـی بـرای ایجـاد اتصـالات، در جـــدول (۲) آورده شـــده اســـت. متغیرهـــای دیگـــر جوش‌کاری که ثابت در نظر گرفتـه شـدند، در جـدول (۳) نشان داده شده‌اند. با توجه به تعداد متغیرها و تراز آن‌ها، از آرایه‌ی اُرتوگُنـال L9(۳٤) اسـتفاده شـد. ایـن آرایه در جدول ٤ ارائه شده است. فرایند جوش‌کاری با استفاده از دستگاه جوش‌کاری TIG خودکار با فرکانس بالا (PSQ250-AC/DC) با جریان پالسی مربعی بالانس با استفاده از جریان متناوب مربعـی شـکل انجـام شـد. هدف دست‌یابی به خاصـیّت تمیزکـاری کاتـدی حـین جوش‌کاری، به‌دلیل تمایل بالای منیـزیم بـه اکسـایش، [19]، بود. جوش‌کاری بدون فلز پرکننده در یک پـاس و بر اساس ردیف آزمایش‌های جدول ٤ بر روی ورق‌هـایی بـا ابعـاد ۲mm× ۵۰mm×۱۰۰mm در راسـتای عرضی انجام شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ منیزیم AZ31 مورد استفاده در این تحقیق

آلیاژ	مقدار عنصر (wt.%)						
	Mg	Fe	Cu	Si	Mn	Zn	Al
AZ31	مابقی	۰/۰۰٤	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰/۳۷۵	۱/۱۱۷	۳/۰۲۳

جدول ۲ مهم‌ترین متغیرهای فرایند جوش‌کاری پالسی و تراز آن‌ها

نماد	متغیر	واحد	تراز ۱	تراز۲	تراز ۳
I_p	جریان بیشینه	A	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
I_b	جریان کمینه	A	۲۰	۳۰	٤۰
S	سرعت جوش‌کاری	mm/min	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
F	فرکانس پالس	Hz	۱/٦	۲/۵	۵

جدول ۳ عوامل ثابت حین جوش‌کاری

نوع فرایند	P-GTAW(a)
نوع جریان	AC
نسبت پالس	٪۵۰
قطر الکترود	۲/٤ mm
نوع الکترود	تنگستن با ۲٪ اکسید توریم
طول قوس	۱ mm
نوع گاز محافظ	آرگون خالص (۹۹/۹ ٪)
نرخ دبی گاز	۱۲ lit/min

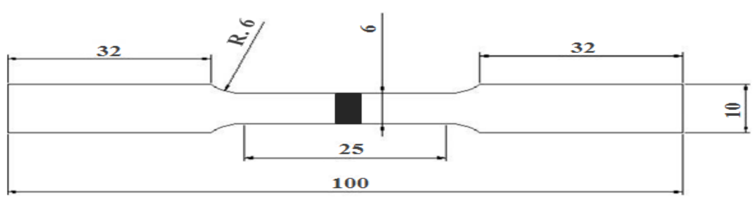
(a) Pulse Gas Tungsten Arc Welding

قبل از انجام جوش‌کاری، سطح ورق‌ها به‌منظور رفع آلودگی‌ای سطحی نظیر چربی‌ها، با اَستُن شسته شدند و سپس، برای اکسیدزدایی سطحی با بُرسی از جنس فولاد زنگ‌نزن برس زده شدند. به‌منظور انجام آزمون کشش، نمونه‌ها از بخش میانی اتصال جوش‌ها تهیّه و مطابق با استاندارد ASTM E8، [20]، ماشین‌کاری شدند. هندسه‌ی نمونه‌های آزمون کشش در شکل(۱) آورده شده است. برای اطمینان از وقوع شکست در فلز جوش در نمونه‌های آزمون کشش، شیاری به‌عمق ۱ میلی‌متر در فلز جوش تعبیه شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال (Instron Corporation Series IX) با سرعت حرکت فک برابر با mm/min ۰/۵ انجام شد. برای ریزسختی سنجی، از روش ویکرز با نیروی ۳۰ گرم با مدّت زمان ۱۵ ثانیه استفاده شد. استحکام کششی نهایی و سختی اتصالات با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 ارزیابی شدند. پس از جوش‌کاری، مقاطع عرضی از بخش میانی هر یک از جوش‌ها، به‌منظور کسب اطمینان از وجود مشخصّه‌های واقعی جوش‌کاری، تهیّه شدند، و پس از انجام مراحل مانت و سمباده‌زنی، صیقل‌کاری شدند. سپس نمونه‌ها در محلولی حاوی ۴/۲ gr اسید پیکریک، ۱۰ml اسید اَستیک، ۱۰ ml آب و ۷۰ ml اِتانول، به‌مدّت ۱۵ تا ۳۰ ثانیه حکّاکی شدند. افزون بر این، برای تعیین اندازه‌ی دانه‌های ریزساختارها، از روش تقاطع خطی مطابق با استاندارد ASTM E112 استفاده شد.

ارائه نتایج و بحث

آزمون‌های کشش و سختی‌سنجی بر اساس آرایه‌ی اُرتوگُنال تاگوچی L9(۳۴) انجام شدند، و نتایج میانگین دو آزمون برای استحکام کششی نهایی و چهار آزمون برای سختی‌سنجی در جدول (٤) نشان داده شده‌اند. با توجه به این‌که استحکام کششی نهایی بالاتر مطلوب‌تر است، در روش تاگوچی (نرم‌افزار-Qualitek 4) از گزینه‌ی هر چه بزرگ‌تر بهتر (Biggest is the Best) استفاده شد. بر این اساس، میانگین جواب‌ها برای هر عامل در ترازهای مختلف به‌دست آمد. این نتایج در جدول (۵) برای متغیرهای مختلف نشان داده شده‌اند. با توجّه دقیق در جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که ترازهای بهینه‌ی متغیرها برای هر یک از دو ویژگی نشانه، یعنی استحکام کششی نهایی اتصالات و سختی، جریان بیشینه (I_P) در تراز ۱، جریان کمینه (I_b) در تراز ۲، سرعت (S) در تراز ۲ و فرکانس پالس (F) در تراز ۳ هستند.

هدف از آنالیز واریانس آنُوا (ANOVA)، بررسی سهم هر یک از متغیرها در ویژگی نشانه است. نتایج واریانس برای استحکام کششی نهایی اتصالات در جدول (٦) و برای سختی فلز جوش در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. جدول (٦)، جدولی ادغام شده‌ی آنُوا نامیده می‌شود، زیرا متغیرهایی که تأثیر قابل توجه‌ای بر استحکام کششی نهایی ندارد (آن‌هایی که میانگین جواب ترازهایشان نزدیک به یک‌دیگر است) ادغام شده‌اند. در این حالت، متغیر سرعت جوش‌کاری، با توجه به شکل (۵-پ)، ادغام شده است. همان‌گونه که در جدول (٦) مشاهده می‌شود، جریانِ بالایی پالس (۵۸/۵٦٪) و فرکانس پالس (۲۳/۸٤٪) بیش‌ترین تأثیر را بر استحکام کششی نهایی اتصال دارند.



شکل ۱ هندسه‌ی نمونه‌ی آزمون کشش [۲۰]

جدول٤ آزمایش‌های طرّاحی شده با استفاده از آرایه‌ی اُرتوگُنال L9(۳٤) و نتایج آزمایش‌ها برای استحکام کششی نهایی

شماره‌ی آزمایش	متغیرها و تراز آن‌ها: جریان بیشینه (Ip)	جریان کمینه (Ib)	سرعت جوش‌کاری (S)	فرکانس (F)	استحکام کششی نهایی (UTS) MPa	سختی فلز جوش (عدد سختی ویکرز)
۱	۱	۱	۱	۱	۱۹۷/۹۱۷	٦۷/۳
۲	۱	۲	۲	۲	۲۳۰/۷۱٤	۷۳/۸
۳	۱	۳	۳	۳	۲۱٤/۸۸	٦۹/٤
٤	۲	۱	۲	۳	۲۲۲/۷۹۸	۷۱/۱
۵	۲	۲	۳	۱	۱۷۹/۸۲۱	٦٤/۲
٦	۲	۳	۱	۲	۱٦۵/۱۱۹	٦۳/۸
۷	۳	۱	۳	۲	۱٤۱/۳٦۹	٦۲/۱
۸	۳	۲	۱	۳	۱۸۳/۲۱٤	٦۵/۱
۹	۳	۳	۲	۱	۱۰٤/۰٤۷	٦۰/٤

جدول ۵ میانگین استحکام کششی نهایی و سختی فلز جوش برای هر متغیر در ترازهای مختلف

پارامتر	میانگین استحکام کششی نهایی (UTS)				میانگین سختی فلز جوش (VHN)		
	تراز نخست	تراز دوم	تراز سوم		تراز نخست	تراز دوم	تراز سوم
جریان بیشینه (Ip)	۲۱٤/۵	۱۸۹/۳	۱٤۲/۹		۷۰/۱۷	٦٦/۳۷	٦۲/۵٤
جریان کمینه (Ib)	۱۸۷/٤	۱۹۷/۹	۱٦۱/۳		٦٦/۸۳	٦۷/۷	٦٤/۵٤
سرعت جوش‌کاری (S)	۱۸۲/۱	۱۸۵/۸	۱۷۸/۷		٦۵/٤	٦۸/٤٤	٦۵/۲٤
فرکانس پالس (F)	۱٦۰/٦	۱۷۹/۱	۲۰۷		٦۳/۹۷	٦٦/۵۷	٦۸/۵۳

جدول ٦ آنالیز آنُوا برای استحکام کششی نهایی

نماد	متغیر	درجه‌ی آزادی (DOF)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	F-Ratio	مجموع مربعات خالص (S')	درصد مشارکت (ρ , %)
I_p	جریان بیشینه	۲	۷۹۱۸/٤۹	۳۹۵۹/۲۵	۱۰۲/۸	۷۸٤۱.٤٦	۵۸/۵٦
I_b	جریان کمینه	۲	۲۱۲۵/۲۹	۱۰٦۲/٦۳	۲۷/٦	۲۰٤۸/۲۳	۱۵/۳
S	سرعت جوشکاری	–	ادغام شده	–	–	–	–
F	فرکانس	۲	۳۲٦۹/۵۹	۱٦۳٤/۷۷	٤۲/٤۵	۳۱۹۲/۵۱	۲۳/۸٤
Error	خطا	۲	۷۷/۰۳	۳۸/۵۲	–	۳۰۸/۱۳	۲/۳
کل	–	۸	۱۳۳۹۰/۳۲	–	–	–	۱۰۰ ٪

این رفتار را می‌توان چنین تحلیل کرد که حین جوش‌کاری، منیزیم و روی در دمای بالا، به‌دلیل داشتن نقاط ذوب و جوش پایین‌تر و فشار بخار بالاتر نسبت به آلومینیم به‌راحتی تبخیر می‌شوند (نسبت نقاط ذوب به جوش فلزات آلومینیم، منیزیم و روی بر حسب دمای مطلق به‌ترتیب برابرند با ۹۳۳/۲۳۳۳، ۹۲۳/۱۳۸۰،

۶۹۳/۱۰۲۳، [21]). تأثیر استحکام‌دهی روی در آلیاژهای Mg-Al-Zn به‌علت تشکیل محلول جامد و افزایش حلالیّت آلومینیم است. در حقیقت، تبخیر روی در جریان بیشینه بیش‌تر می‌شود و در نتیجه، گرمای ورودی بالاتر منجر به کاهش تأثیر استحکام‌دهی محلول جامد آلومینیم و روی در اتصالات می‌شود. افزون بر این، افزایش سختی را می‌توان به ریز بودن دانه‌ها در گرمای ورودی کم‌تر، به‌دلیل جریان بیشینه‌ی کم‌تر (تراز نخست) و تأثیر استحکام‌دهی فاز سخت و پراکنده‌ی $\beta\text{-}Mg_{17}Al_{12}$ مربوط دانست.

در مطالعه‌ی کومار و همکاران، [5,10,11]، بر روی جوش‌های TIG پالسی فلزات آلومینیم و تیتانیم به بهبود خواص مکانیکی با افزایش فرکانس پالس اشاره شده است. این پژوهش‌گران ادعا کرده‌اند که افزایش فرکانس پالس منجر به ایجاد اختلال بیش‌تر گرمایی و مکانیکی می شود، به‌گونه‌ای که پیامد شکل‌گیری دانه‌های ریزتر و هم‌محور در فلز جوش خواهد بود. هم‌چنان که محققین دیگر، [22,23]، گزارش کرده‌اند، هنوز سازوکار خاصی برای ریزدانه شدن فلز جوش در جوش‌های پالسی وجود ندارد. با این وجود، توافق در سه مورد حاصل شده است: ۱- سرعت سرمایش بالاتر به‌علت گرمای ورودی کم‌تر، ۲- افزایش اختلال و اغتشاش در حوضچه‌ی جوش که منجر به شکست دندریت‌ها و سلول‌های در حال رشد می‌شود، و ۳- جوانه‌زنی سطحی که منجر به افزایش دانه‌ها و پیدایش دانه‌های ریزتر در جوش‌های پالسی می‌شود [24].

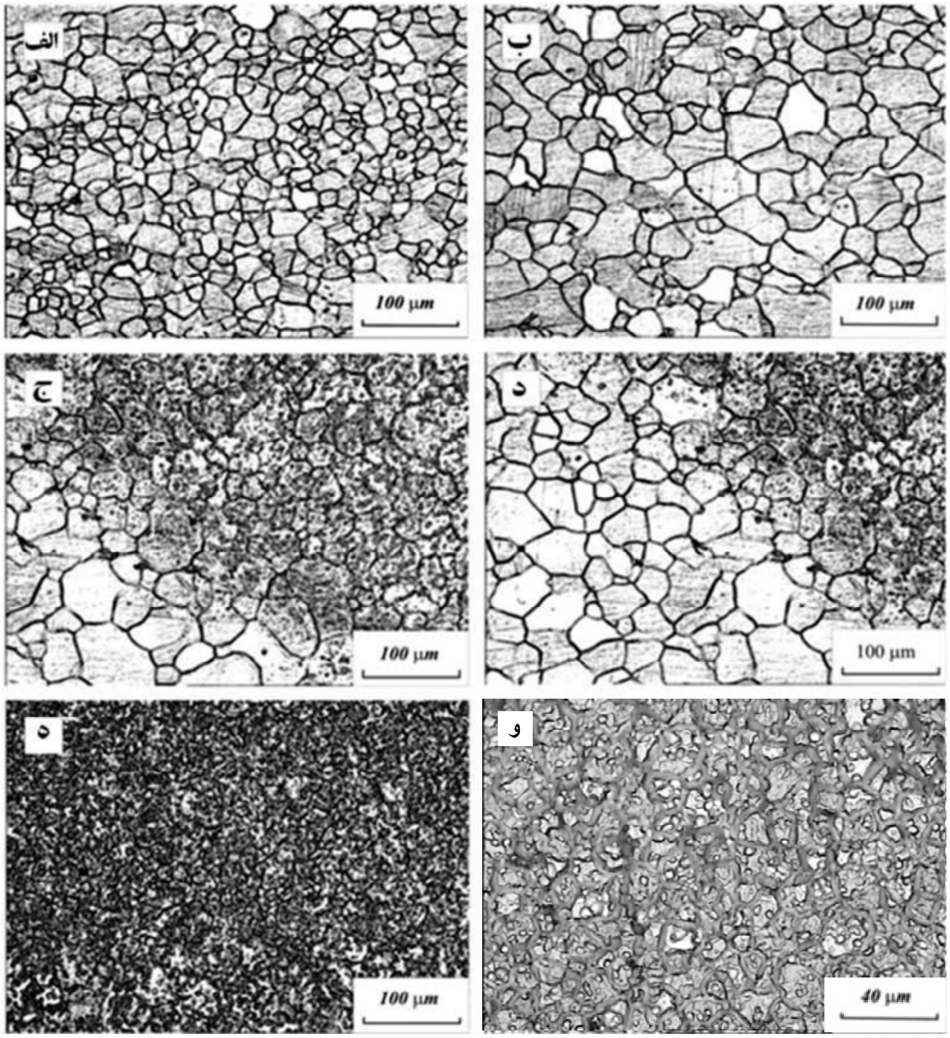
آخرین مرحله در روش تاگوچی، پیش‌بینی و تأیید بهبود ویژگی نشانه با استفاده از ترازهای بهینه‌ی متغیرهاست. استحکام کششی نهایی پیش‌بینی‌شده را می‌توان با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه کرد:

$$\overline{T} = \frac{T}{n} \qquad (۱)$$

$$Y = \overline{T} + (I_{p_1} - \overline{T}) + (I_{b2} - \overline{T}) + (S_2 + \overline{T}) + (F_3 + \overline{T})$$

که در آن‌ها، $\overline{T}$ میانگین کل جواب‌هاست که مقدار آن از جدول (۵) برای استحکام کششی نهایی برابر با ۱۸۲/۲ و برای سختی فلز جوش برابر با ٦٦/٣ به‌دست می‌آید. افزون بر این، Ip_1 ، Ib_2 ، S_2 و F_3 مقادیر میانگین مربوط به استحکام کششی نهایی در ترازهای بهینه‌ی متغیرها می‌باشند که از جدول (۵) به‌دست می‌آیند. اگر شرایط بهینه‌ی آزمایش در رابطه‌ی ۱ قرار داده شود، تابع ارائه شده عدد ۲۵٤/۹ MPa را برای استحکام کششی نهایی و ۷۵/۷٦ را برای سختی فلز جوش پیش‌بینی خواهد کرد. به‌منظور ارزیابی نتایج پیش‌بینی‌شده، آزمایش‌ها بر اساس ترکیب متغیرهای بهینه انجام شدند. در جدول (۸)، نتایج پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی بر اساس شرایط بهینه با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. آشکار است که مطابقت خوبی بین نتایج آزمایش‌ها و نتایج بهینه‌ی پیش‌بینی شده وجود دارد.

شکل (۲) ریزساختار ناحیه‌ی اتصال جوش TIG پالسی آلیاژ AZ31 برای آزمایش شماره‌ی ٤ را نشان می‌دهد. فلز پایه ساختاری متشکّل از دانه‌های یکنواخت با اندازه دانه‌ی متوسط ۲۲/۲ میکرون دارد (شکل۲- الف). این ساختار ناشی از تبلور مجدد حین نورد گرم می‌باشد. شکل (۲- ب) نشان‌دهنده‌ی ریزساختار فلز پایه در فاصله‌ی ۳ میلی‌متری از مرکز فلز جوش است که شامل بلورهای هم‌محور می‌باشد. شکل (۲- پ) منطقه‌ی مرز جوش را نشان می‌دهد. در این ناحیه، دانه‌ها در فلز جوش رشد هم بافته‌ای از دانه‌های فلز پایه را دارند. شکل ۲- ت ریزساختار در ناحیه‌ی چسبیده به مرز مذاب/جامد و در فلز پایه را نشان می‌دهد که در آن، دانه‌ها در مقایسه با دانه‌های شکل (۲- ب) درشت‌تر شده‌اند. این پدیده حین جوش‌کاری اتفاق افتاده است، و دلیل آن افزایش دمای این ناحیه به بالاتر از دمای تبلور مجدد برای آلیاژهای منیزیم سری AZ (حدود ۲۰۵ °C ،[25]) می‌باشد. شکل‌های (۲- ث) و (۲- ج) ریزساختارهای ناحیه‌ی ذوب را نشان می‌دهند. این ناحیه شامل فاز سفید رنگ α-Mg و فاز تیره‌ی یوتکتیک $\beta\text{-}Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این ناحیه از دانه‌های ریز و هم‌محور تشکیل شده است.



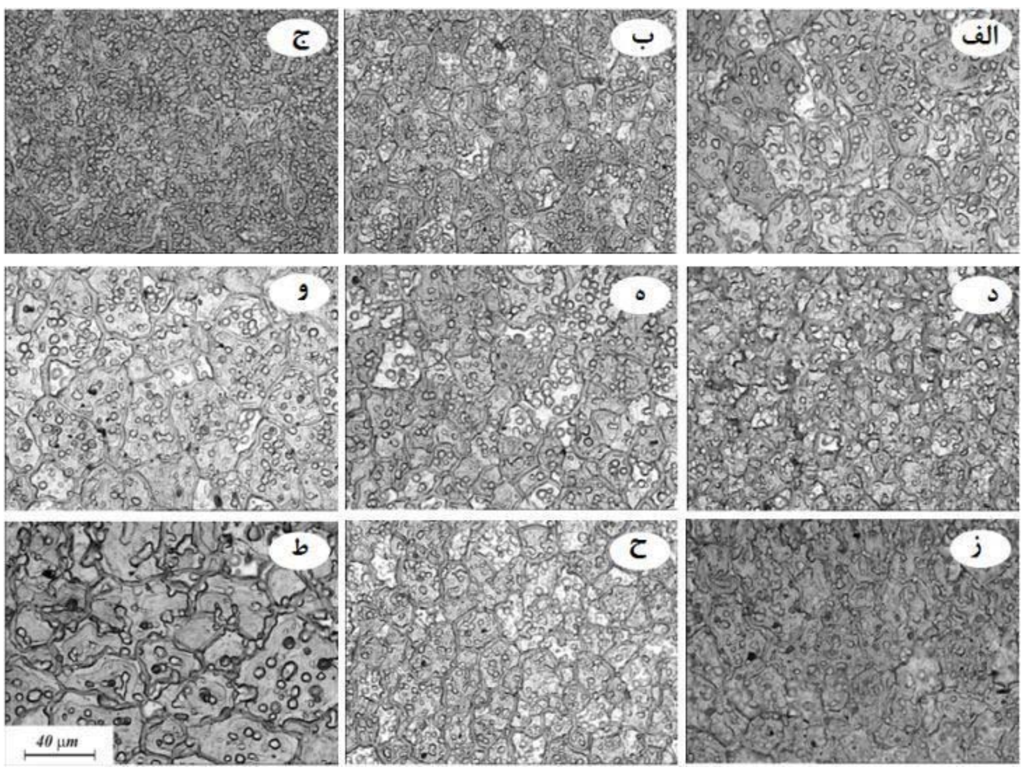
شکل ۲ ریزساختار اتصال جوش مربوط به آزمایش شماره ٤؛ (الف) ریزساختار فلز پایه‌ی AZ31، (ب) ریزساختار فلز پایه در فاصله‌ی ۳ میلی‌متری از مرکز جوش، (پ و ت) مرز جوش، و (ث و ج) ناحیه‌ی جوش

جدول ۷ آنالیز آنُوا برای سختی فلز جوش

نماد	متغیر	درجه‌ی آزادی (DOF)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	F-Ratio	مجموع مربعات خالص (S')	درصد مشارکت (ρ , %)
I_p	جریان بیشینه	۲	۸۷/٤۰٦	٤۳/۷۰۳	–	۸۷/٤۰٦	٥٦/٦۰۱
I_b	جریان کمینه	۲	۱٦/۰٦۷	۸/۰۳۳	–	۱٦/۰٦۷	۱۰/٤۰٤
S	سرعت جوش‌کاری	۲	۱۹/٤٦۹	۹/۷۳٤	–	۱۹/٤٦۹	۱۲/٦۰۷
F	فرکانس	۲	۳۱/٤۷۷	۱٥/۷۳۸	–	۳۱/٤۷۷	۲۰/۳۸۳
Error	خطا	۰	–	–	–	–	–
کل	–	۸	۱٥٤/٤۲٤		–	–	۱۰۰٪

جدول ۸ تأیید نتایج بهینه

مقدار آزمایشگاهی	مقدار بهینه		شرایط آزمایش	ویژگی نشانه
۲۵۳	۲۵۵		$Ip_1I_{b2}S_2F_3$ یعنی: جریان بیشینه در تراز ۱ (۸۰A)، جریان کمینه در تراز۲ (۳۰A)، سرعت جوش‌کاری در تراز ۲ (۲٤۰mm/min) و فرکانس پالس در سطح ۳ (۵Hz).	استحکام کششی نهایی(MPa)
۷۵	۷۷			سختی فلز جوش (VHN)



شکل ۳ تصویرهای ریزساختار فلز جوش اتصال در جوش‌کاری پالسی؛ (الف)آزمایش ۱، (ب) آزمایش۲، (پ) آزمایش۳، (ت) آزمایش٤، (ث) آزمایش۵، (ج) آزمایش٦، (چ) آزمایش۷، (ح) آزمایش۸ (ط) آزمایش۹. همه‌ی تصویرها دارای بزرگ‌نمایی یکسان و برابر با تصویر (ط) هستند

ریزساختارهای آلیاژ در مرکز جوش‌های پالسی بر اساس ترتیب آزمایش‌های تاگوچی در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، در نمونه‌ی مربوط به آزمایش شماره‌ی ۳ در مقایسه با نمونه‌های دیگر، دانه‌های ریزتر و هم‌محوری تشکیل شده‌اند.

نتیجه‌گیری

تأثیر متغیرهای جوش‌کاری TIG پالسی مانند جریان

بیشینه‌ی پالس، جریان کمینه‌ی پالس، سرعت جوش‌کاری و فرکانس پالس، بر خواص مکانیکی (استحکام کششی نهایی و سختی) در آلیاژ منیزیم AZ31 مطالعه شد و نتایج زیر به‌دست آمدند:

– برای هر دو ویژگی نشانه، یعنی استحکام کششی نهایی و سختی فلز جوش، شرایط بهینه‌ی یکسانی برای ($Ip_1I_{b2}S_2F_3$) به‌دست آمد، و مشخص شد که شدت جریان بیشینه و فرکانس پالس بیش‌ترین تأثیر را بر استحکام کششی نهایی (UTS) و سختی فلز جوش دارند. استحکام کششی نهایی معادل ۲۵۳MPa و سختی فلز جوش معادل ۷۵ ویکرز به‌صورت آزمایشگاهی بهینه شد. رفتار مکانیکی فلز جوش در شرایط بهینه‌ی ($Ip_1I_{b2}S_2F_3$) به مقدار بیش‌تر رسوب فاز سخت و پراکنده‌ی β-$Mg_{17}Al_{12}$ در زمینه‌ی α-Mg مربوط می‌شود. افزون بر این، بررسی تصاویر متالوگرافی نشان داد که در مرکز جوش ساختار ریزدانه به‌وجود آمده که باعث افزایش بیش‌تر خواص مکانیکی شده است.

مراجع

1. Kulekci. M. K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, pp 851-865, (2008).
2. Cao, X., Jahazi. M., Immarigeon, J. P., Wallace, W., "A review of laser welding techniques for magnesium alloys" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, pp. 188-20, (2006).
3. Munitz, A., Cotler, C., Stern, A., Kohn, G., "Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates", Materials Science and Engineering, Vol. 302. pp. 68-73, (2001).
4. Needham, J. C., "Pulsed Current Tungsten Arc Welding – an introduction to the process", Pulsed TIG Welding Seminar, UK, P1, (1973).
5. Senthil Kumar T., Balasubramanian, V., and Sanavullah, M. Y., "Effect of pulsed current TIG welding parameters on tensile properties of AA6061 aluminium alloy", Indian Welding Society. PP. 29-39, (2005).
6. Gokhale, A. A., Tzavaras, A. A., Brody, H. D., Ecer, G. M., Abbaschian, G. J., and David, S. A., "Grain Refinement in Castings and Welds", TMS-AIME, Warrendale, PA, p. 223, (2005).
7. Balasubramanian, M., Jayabalan, V. Balasubramanian, V., "Effect of Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding Parameters on Microstructure of Titanium Alloy Welds," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 131, p. 064502, (2009).
8. Kumar, A., and Sundarrajan, S., "Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments," *Materials & Desig*n, Vol. 30, pp. 1288-1297, (2009).
9. Madhusudhan Reddy, G., Gokhale, A. A., Prasad Rao, K., "Optimization of pulse frequency in pulsed current gas tungsten arc welding of Al–lithium alloy steels," *J Mater Sci Technol*, Vol. 14, pp. 61-6, (1998).

10. Senthil Kumar, T., Balasubramanian, V., Sanavullah, M. Y., "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy," *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 2080-2092, (2007).
11. Kumar A, S. S., "Selection of welding process parameters for the optimum but joint strength of an aluminum alloy," *Materials Manufacturing Process* ,Vol. 21(8), pp. 789–793, (2006).
12. Phadke, M. S, "Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall," Englewood Cliffs, NJ, (1989).
13. Ross, P., "Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design", McGraw-Hill Professional, (1996).
14. Balasubramanian, M., Jayabalan, V., Balasubramanian, V., "Optimizing the pulsed current gas tungsten arc welding parameters,":, Vol. 22, pp. 821-825, (2006).
15. Giridharan, P. and Murugan, N, "Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, pp. 478-489, (2009).
16. Kumar, A. and Sundarrajan, S, "Effect of welding parameters on mechanical properties and optimization of pulsed TIG welding of Al-Mg-Si alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 42, pp. 118-125, (2009).
17. Pan, L.K., Wang C. C., Hsiao, Y. C., Ho, K. C., "Optimization of Nd: YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis," Optics & Laser Technology, Vol. 37, pp. 33-42, (2005).
18. R. O'brien, "Welding Handbook". Vol. 2: Welding Processes.(Retroactive Coverage), American Welding Society, p. 955, (1991).
19. ASM International, Welding, brazing and soldering. ASM handbook, Vol 6. Materials Park, Ohio, (1993).
20. A. S. f. Testing and Materials, "Annual book of ASTM standards," (1987).
21. Arboggini A, Mcshane H. B., "Effect of Zn and Si additions on structure and properties of rapidly solidified Mg–Al alloys", J Mater Sci Technol:9. PP.763–9. (1994).
22. Manti, R. and Dwivedi, D., "Microstructure of Al–Mg–Si Weld Joints Produced by Pulse TIG Welding," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 22, pp. 57-61, (2007).
23. Manti, R. Dwivedi, D. K., and Agarwal, A., "Microstructure and hardness of Al-Mg-Si weldments produced by pulse GTA welding," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 36, pp. 263-269, (2008).
24. Manti, R. Dwivedi, D. K., and Agarwal, A., "Pulse TIG Welding of Two Al-Mg-Si Alloys," Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 17, pp. 667-673, (2008).
25. Cao, X., Jahazi, M., "Effect of welding speed on the quality of friction stir welded butt joints of a magnesium alloy", Materials & Design, Vol. 30, pp. 2033–42. (2009).